



DESIGN FOR DISASSEMBLY

Håndbog om affaldsforebyggelse
i byggeriet



TEKNOLOGISK
INSTITUT

**Titel**

Design for Disassembly –
Håndbog om affaldsforebyggelse
i byggeriet

Udgivelsesår

2019

Forfattere

Abelone Køster, Katrine Hauge Smith og
Katja Udbye Christensen, Teknologisk
Institut

Om håndbogen

Håndbogen er udarbejdet af Teknologisk
Institut under aktivitetsplanen "Affalds-
forebyggelse inden for byggeri" 2016-18.
Aktiviteten er støttet af Styrelsen for
Institutioner og Uddannelsesstøtte.

Det er tilladt at kopiere tekst fra håndbo-
gen, såfremt der laves tydelig kildehen-
visning.

Layout & tryk

Teknologisk Institut

ISBN

978-87-7756-822-0 (print)
978-87-7756-823-7 (digital)



**TEKNOLOGISK
INSTITUT**

Indhold

Om udgivelsen	5
Introduktion til Design for Disassembly	6
Affaldshierarkiet	
Affaldshierarkiet – niveau for genanvendelse	10
Niveau for demontering	16
Guidelines	
Guidelines for Design for Dissassembly	22
Guidelines og dilemmaer	26
Opsamling på guidelines	34
Succeskriterier og udfordringer	
Succeskriterier for Design for Disassembly	38
Tekniske og markedsmæssige udfordringer ved Design for Disassembly	42
Standardisering	
Standardisering: Udfordringer og muligheder	50
Konklusion og anbefalinger	
Konklusion og anbefalinger	56
Eksempler	
Eksempler	62
Eksempel 1: Optimering af bygningens levetid "genbrug af bygning"	63
Eksempel 2: Genanvendelse af præfabrikerede bygningsdele og større elementer	65
Eksempel 3: Genbrug af materialer og mindre komponenter	70
Eksempel 4: Oparbejdelse af materialer til nye råmaterialer	73
Få hjælp hos Teknologisk Institut	76
Henvisninger og litteratur	78

**KOST
&
SKOVL**

**Mursten
Tegl
Gasbeton**

Om udgivelsen

Denne håndbog er udarbejdet under aktivitetsplanen "Affaldsforebyggelse inden for byggeri" 2016-18. Aktiviteten er støttet af Styrelsen for Institutioner og Uddannelsesstøtte

Håndbogen handler om Design for Disassembly (DfD), som er udpeget som et væsentligt princip for forebyggelse af affald i byggeriet. DfD forstås som designprincipper, som faciliterer adskillelse af komponenter eller materialer i en bygning, så de kan genanvendes eller genbruges, hvorved affaldsmængden mindskes. Håndbogen omhandler ikke minimering af affald fra emballage.

Håndbogen samler op på udvalgte undersøgelser og forskning, suppleret med Teknologisk Instituts egne erfaringer, diskuterer dem og fremkommer med konkrete anbefalinger. Derudover giver håndbogen eksempler på konkrete koncepter og materialer, som kan

have forskellige fordele og ulemper i forhold til DfD.

Sidst i håndbogen findes en litteraturliste, hvortil der henvises med numre med hævet skrift.

Formålet med håndbogen er at bidrage til implementering af Design for Disassembly i den danske byggebranche ved at:

- Skabe en større fælles forståelse for begreber og problemstillinger inden for emnet
- Samle op på udvalgte forskningstiltag og guidelines, og relatere dem til konkrete eksempler og materialer
- Fremkomme med anbefalinger til de mest praksisnære tiltag, som vurderes at have størst chance for succes
- Understøtte anbefalingerne med ydelser fra Teknologisk Institut

Introduktion til Design for Disassembly

Design for Disassembly er et designprincip, som indtænker fremtidig nedtagning, adskillelse og udsortering af byggekomponenter og -materialer på forskelligt niveau. DfD anses for et væsentligt værktøj til affaldsforebyggelse.

Affaldsforebyggelse udgør i sig selv et vigtigt element af den cirkulære økonomiske tankegang, der igen er en forudsætning for bæredygtig udvikling i tråd med FNs 17 verdensmål.

Formålet med Design for Disassembly er således at bidrage til at nedsætte forbruget af især ikke-fornybare ressourcer, og at nedsætte mængden af affald. For byggebranchen betyder Design for Disassembly, at byggevarer og -materialer i en bygning skal udtages, udsorteres og genanvendes. Dette kan ske ved direkte genbrug, dvs. at byggevareren bruges igen uden videre forarbejdning, eller ved at genanvende rene materialestrømme, dvs. materialerne genanvendes i nye produkter efter forarbejdning.



”

Design for Disassembly er et designprincip, som indtænker fremtidig nedtagning, adskillelse og udsortering af byggekomponenter og -materialer på forskelligt niveau. DfD anses for et væsentligt værktøj til affaldsforebyggelse.



”

Affaldshierarkiet definerer et hierarki i forhold til prioritering af affaldsbehandlingsformer, og i Danmark anvendes det særligt i forhold til den kommunale affaldsbehandling.



Affaldshierarkiet

Affaldshierarkiet

– niveau for genanvendelse

Genanvendelse kan foregå på flere måder og rangerer fra direkte genbrug af bygningsdele eller -komponenter til forbrænding, hvor kun energien nyttiggøres. I EU's affaldsrammedirektiv er affaldshierarkiet opstillet for at skelne mellem disse begreber, og affaldshierarkiet er implementeret i dansk lovgivning i Miljøbeskyttelsesloven og Affaldsbekendtgørelsen. I affaldspolitikken i Danmark og EU fungerer affaldshierarkiet som et prioriteringsværktøj.

Kort fortalt definerer affaldshierarkiet et hierarki i forhold til prioritering af affaldsbehandlingsformer, og i Danmark anvendes det

særligt i forhold til den kommunale affaldsbehandling. Affaldshierarkiets prioritering kan fraviges, hvis en livscyklusbetragtning kan godtgøre, at der er større miljømæssig gevinst ved en behandlingsform længere nede i hierarkiet. Tekniske hensyn og indhold af skadelige stoffer kan også medføre at affaldet behandles længere ned i hierarkiet.

Nedenfor er en beskrivelse af affaldshierarkiet. Affaldsforebyggelse prioriteres før forberedelse med henblik på genbrug, som prioriteres over genanvendelse osv. I affaldsbekendtgørelsens § 2 findes de præcise juridiske definitioner.



- **Affaldsforebyggelse** er at undgå at skabe affald, og derfor findes begrebet ikke i affalds-bekendtgørelsen. Dette kan fx gøres ved at mindske spild i byggeprocessen samt ved at reducere indholdet af problematiske stoffer i byggevarer.
- **Forberedelse med henblik på genbrug** er, når produkter forberedes (kontrol, rengøring eller reparation), således at de kan genbruges uden anden forbehandling.
- **Genanvendelse** er, når affaldsmaterialer forarbejdes om til produkter, materialer eller stoffer, hvad enten de bruges til det oprindelige formål eller andre formål.
- **Anden nyttiggørelse** er, når affaldet opfylder et nyttigt formål ved at erstatte

anvendelsen af andre materialer, der ellers ville være blevet anvendt til at opfylde en bestemt funktion. Dette kan også være energinyttiggørelse ved forbrænding.

- **Bortskaffelse** er, når affaldet ikke opfylder et nyttigt formål.

For at kunne drøfte fordele og ulemper ved forskellige fremgangsmåder inden for DfD, er det hensigtsmæssigt at anvende affaldshierarkiet. Imidlertid anvendes også andre begreber i branchen, der har til formål at illustrere de forskellige niveauer i genanvendelse. Disse er tilføjet som underinddelinger i tabel 1.

I teorien er det mest værdifuldt at genbruge (niveau 1), idet al værdi i komponenten da kan bevares. I praksis falder komponentens

EU affaldshierarki	Niveau	Betegnelse	Definition	Eksempel	Engelsk
Forberedelse med henblik på genbrug	1	Genbrug	En komponent som anvendes til samme formål som oprindelig	Vinduer eller sanitet, som udtages og genbruges.	Re-use
Genanvendelse (når affaldsmaterialer forarbejdes om til produkter, materialer eller stoffer, til det oprindelige eller andre formål)	2a	Genbearbejdning	En komponent som adskilles og samles til nye produkter uden bearbejdning/ændring af enkeltdele	Vindue adskilles på vinduesfabrik, glas og andre dele anvendes til nye vinduer	Re-manufacture
	2b	Genanvendelse	Opdeling i grundmaterialer og bearbejdning til nye produkter.	Beton nedknuses og fraktioner sorteres til anvendelse som tilslag i ny beton	Recycling
	2c	Materiale genindvinding	Specifikke materialer eller -blandinger bearbejdes til nyt råmateriale	Nedknust og rensede mineralske materialer som kan erstatte sand i visse produkter	Material recycling
Anden nyttiggørelse	3a	Anden nyttiggørelse	Inkluderer nedknust byggeaffald til nyttiggørelse i bygge- og anlægsprojekter, fx. til vejfyld	Murværk knuses ned usorteret og bruges til vejfyld	Recovery, men kaldes ofte også Downcycling
	3b	Nyttiggørelse ved forbrænding	Omfatter oftest energiudvinding fra byggeaffald som afbrændes		Energy recovery
Bortskaffelse	4	Affald	Ingen genanvendelse eller nyttiggørelse	Asbestplader til deponi	Disposal
		Vedligehold (ikke EoL)	Levetiden forlænges med reparation, vedligehold, udskiftning af slidagedele	Udskifte nedbrudte glaslister på et vindue. Omfuge en mur.	Maintenance

Tabel 1. Hierarki for genanvendelse.

Begreberne er fra affaldshierarkiet, som er kombineret med begreber fra andre kilder, primært ⁷⁾ men også suppleret fra ⁵⁾ m.fl.

værdi dog over tid, pga. følgende forhold:

- a. den teknologiske udvikling på tilsvarende produkter, der foregår i komponentens brugstid,
- b. ændringer i lovgivningsmæssige krav, som er sket inden komponenten indbygges på ny,
- c. udvikling i smag, design og mode og
- d. det slid der har været på komponenten i dens hidtidige brugstid.

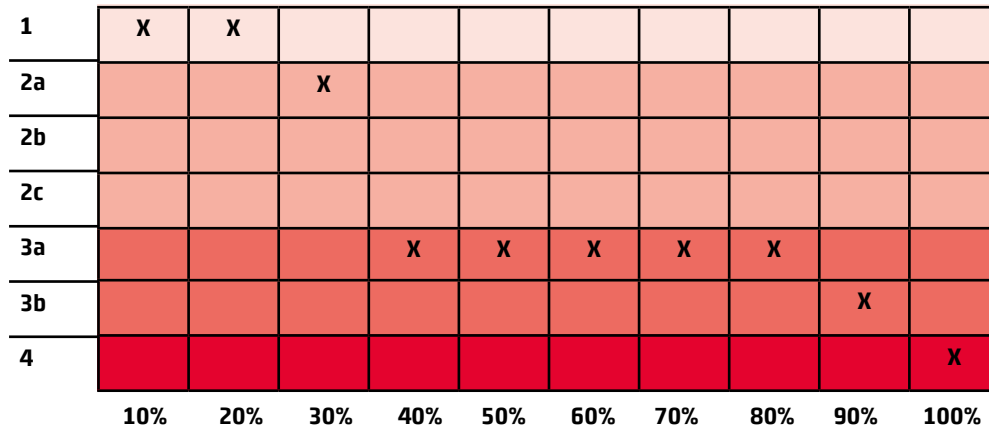
Et eksempel:

Et vindue fra 1970 vil i teorien bevare sin værdi, hvis det genbruges, men i praksis og i forhold til ovenstående er værdien lav, da a) den teknologiske udvikling har gjort, at vinduets egenskaber f.eks. isoleringsevne er kraftigt forringet i forhold til nye vinduer, b) ændrede krav til bygningers energibalance forhindrer brug af det dårligt isolerende vindue i nye bygninger, c) udviklingen i design har gjort vinduet utidssvarende og dermed uønsket hos forbrugeren, og d) selv i det tilfælde at vinduet er velbevaret og funktionsdygtigt, bærer det stadig præg af 50 års slid, såsom falmede farver osv.

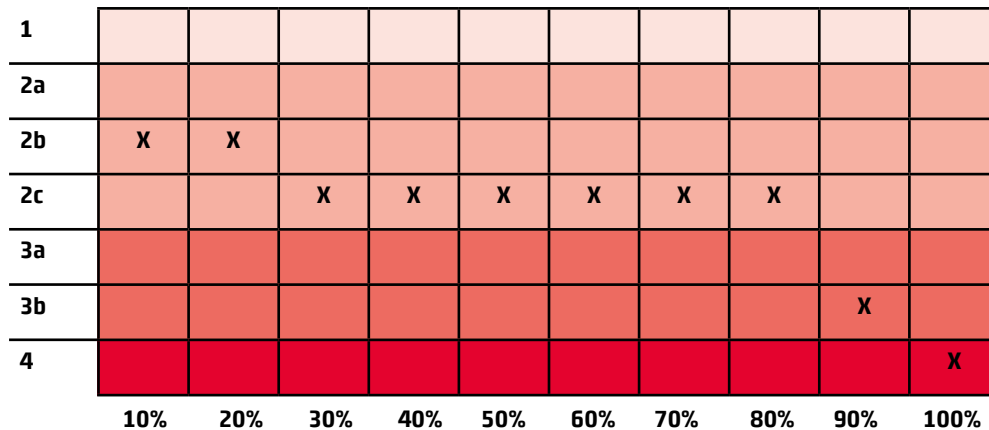
På baggrund af ovenstående er der mange udfordringer ved at designe bygningsdele for genbrug en-til-en i nyt byggeri. De enkelte

bygningsdele bør samtidig designes, så de individuelt kan adskilles i rene materialestrømme. På den måde kan bygningsdelenes forskellige materialer genanvendes separat, hvis direkte genbrug af bygningsdelen ikke er praktisk mulig eller ønskværdig. Således bør det tilstræbes, at den samlede andel, som genanvendes – altså alle niveauer over "Anden nyttiggørelse" – bør være så stor som mulig.

I Danmark er det under 10% af nedrevet materiale, som havner på niveau 4, altså til bortskaffelse. Langt størsteparten nyttiggøres på niveau 3a, nemlig som nedknust materiale til vejfyld, idet langt den største fraktion af materialer (vægtmæssigt) fra nedrivninger er beton, murværk og andet mineralsk materiale. Ambitionen må derfor være at løfte niveauet for den store mængde, men dette kan gøres på flere måder. Figur 1 illustrerer dette med to tænkte eksempler.



Eksempel I:
I dette eksempel er der fokuseret på at nå højt op i affaldshierarkiet. En mindre del, 20%, genbruges, men en temmelig stor del, 60%, nyttiggøres kun ved down-cycling.



Eksempel II:
I dette eksempel har fokus i stedet været på at få en stor del af materialet udnyttet til genanvendelse, f.eks. som ny råvare.

Figur 1. Eksempler på fordeling af bygningen ved endt levetid, som angiver andele til forskellige niveauer i affaldshierarkiet jf. tabel 1.

Figuren illustrerer, at det er vigtigt med en helhedsbetragtning af anvendelsen af de nedrevne materialer, og at det er vigtigt at forholde sig til alle led i affaldshierarkiet.

For at opnå det højest mulige niveau af genanvendelse har det stor betydning, hvordan materialer og komponenter sammenbygges i en bygning, altså hvordan den designes med henblik på demontering.

Demontering i større elementer som kan genbruges direkte, kan ganske vist give et højere niveau for genanvendelse for dele af bygningen – men potentielt også en større andel af affald eller nyttiggørelse på lavt niveau, hvis ikke alle elementer kan genbruges.

Kun hvis elementerne samtidig er designet til demontering i rene materialer, kan affaldsmængden yderligere sænkes. I eksempel II er det muligt at genanvende en stor andel af materialet på niveau 2 (2b og 2c), fordi fokus har været på et design, som muliggør demontering og udsortering i rene materialestrømme.

Derfor er eksempel II i figur 1 den fremgangsmåde af I og II foretrukne, da der samlet set udnyttes flere ressourcer i det nedrevne materiale. Overfor dette har det mindre betydning, at en del af ressourcerne genbruges på et lavere trin af genanvendelseshierarkiet. De økonomiske omkostninger er ikke indtænkt i sammenligningen af de to eksempler.

Niveau for demontering

Med "niveau for demontering" menes, hvor små dele eller hvor rene materialer bygningen kan adskilles i. Et højt niveau for demontering muliggør sortering i rene materialer (træ, glas, beton osv.), et mellemniveau muliggør adskillelse i mindre komponenter (vindue, toilet, huldækelement), og et lavt niveau er f.eks. komplekse konstruktionsdele, som sandwich-facadeelement, badeværelseselement og lignende, som består af flere dele og materialer, der ikke nemt kan adskilles. I 5) og 6) har Crowther udviklet en systematik, som til dels definerer niveau for demontering og som samtidig kobler dette til hierarki for genanvendelse. Systematikken er gengivet i tabel 2, med fortolkning i forhold til tabel 1.

Definitionen af niveau for demontering, som fremgår af tabel 2, siger ikke noget om, hvordan "komponenter" er disponeret i forhold til bygningens konstruktion. En anden væsentlig parameter er således levetiden af forskellige bygningsdele, illustreret ved tabellen nedenfor:

Her opdeles bygningen i:

- Bærende konstruktioner (structure), inklusive dæk, terrændæk og fundament
- Klimaskærm (skin), dvs. facader og tag
- Installationer (services), herunder også aptering som døre, køkken etc.
- Planløsning (space plan), altså rumfordeling og dermed indvendige skillevægge

Niveau for demontering	Hierarki for genanvendelse	Forklaring/eksempel	Engelsk
Materialer	Genanvendelse (og lavere niveauer), niveau 3 til 6	Demontering som gør det nemt at udsortere i træ, glas, beton, metal, tegl etc.	Material recycling
Komponent, dele (indre samlinger)	Genbearbejdning (samt reparation) Niveau 2 og (1)	Dele af en komponent kan udskiftes eller repareres (og hele komponenten kan genbruges)	Component re-manufacture
Komponent, hele (ydre samlinger)	Genbrug, niveau 1	Komponent genbruges i sin helhed, til samme formål	Component reuse
Flytte bygning*)	Niveau 1	Hele bygningen kan skilles ad og genopføres et andet sted	Building relocation

Tabel 2. Niveau for demontering. Med inspiration fra ^{1), 5)} og ⁶⁾.

*) eller fortsat anvendelse af bygningen, med renovering.

Levetiderne i tabel 3 skal forstås dels ud fra materialer og konstruktioners levetid, dels ud fra "anvendelsestiden". For planløsningen afhænger dette af menneskelige og samfundsmæssige faktorer så vel som bygningens oprindelige anvendelse og layout. Levetiderne for planløsning ses da også at variere mest, fra 3 til 40 år. Det er den mest uforudsigelige faktor. Er der tale om butiks- eller forretningslokaler til udlejning, kan levetiden være ned til ½ år.

Opdelingen i lag og komponenter bør overvejes, når bygningens layout og konstruktion designes. Formålet er at sikre, at bygningsdele med forskellig forventet levetid kan adskilles parallelt. Det gør det muligt at adskille de hurtigst opslidte eller forældede uafhængigt af dele med længere levetid.

<i>Opdeling i bygningsdele</i>				<i>Kilde</i>
Bærende konstruktion	Klimaskærm	Installationer	Planløsning	
50	50	15	5-7	Duffy 1989
30-300 (typisk 60)	20	7-15	3-30	Brand 1994
40	15	3	5-8	Cook 1972
25-125	25	5	5	Kikutake 1977
60-100	15-40	5-50	5-7	Curwell 1996
60 (antaget maksimal levetid af bygningen)	20	7-15	3-5	Storey 1995
65	65	10-40	5	Howard 1994
50 (antaget maksimal levetid af bygningen)	30-50	12-50	10	Adalberth 1997
40 (antaget maksimal levetid af bygningen)	36	33	12	McCoubrie 1996

Tabel 3. Forventet levetid i år af forskellige bygningsdele. Tabellen er gengivet fra ⁵⁾



”

Guidelines for DfD er konkrete og praktiske anvisninger, som sikrer at komponenter og materialer kan adskilles og genanvendes.



Guidelines



Guidelines for Design for Disassembly

Guidelines for DfD er konkrete og praktiske anvisninger, som sikrer at komponenter og materialer kan adskilles og genanvendes.

Crowther m.fl. ^(1), 5), 6) har udviklet et antal guidelines for DfD. Disse har ifølge Crowther forskellig relevans for forskellige niveauer af demontering, som defineret i tabel 2 ovenfor. Nogle af dem er generelle for flere niveauer.

De i alt 27 guidelines, som præsenteres i tabel

4, overlapper til dels hinanden.

I den efterfølgende kommentering og tolkning er visse guidelines derfor sammenstillet i grupper, når de reelt har samme sigte, men blot lidt forskellig relevans i forhold til niveau for demontering.

Symbolforklaring

- yderst relevant
- relevant
- sjældent relevant

27 guidelines	Genanvendelse af materialer	Genbejdning af komponenter eller elementer	Direkte genbrug af komponenter	Nedrivning og genopførelse af bygning, eller dele deraf
Nr. 1: "Brug genanvendte eller genanvendelige materialer"	●	●	•	•
Nr. 2: "Minimer antallet af forskellige typer materialer"	●	●	•	•
Nr. 3: "Undgå giftige og farlige materialer".	●	●	•	•
Nr. 4: "Udfør dele, som ikke kan adskilles, af samme materiale"	●	●	•	•
Nr. 5: "Undgå overfladebehandlinger af materialer"	●	●	•	•
Nr. 6: "Identificer materialetyper"	●	●	•	•
Nr. 7: "Minimer antallet af forskellig typer komponenter"	•	•	●	●
Nr. 8: "Brug mekaniske og ikke kemiske samlinger"	•	●	●	●
Nr. 9: "Brug åbne byggesystemer"	•	•	●	•
Nr. 10: "Brug modulært design"	•	•	●	•
Nr. 11: "Design for anvendelse af almindeligt værktøj – undgå specialfabrik"	•	•	●	●
Nr. 12: "Adskil i bærende strukturer fra beklædning"	•	•	●	•
Nr. 13: "Giv adgang til alle dele og samlinger"	•	•	●	●
Nr. 14: "Tilpas komponenters størrelse til håndtering"	•	•	●	●
Nr. 15: "Lever midler til håndtering og placering"	•	•	●	●
Nr. 16: "Sørg for rimelige tolerancer til samling og adskillelse"	•	•	●	●
Nr. 17: "Brug et minimalt antal samlinger"	•	•	●	●
Nr. 18: "Brug minimalt antal forskellige forbindelsesmetoder".	•	•	●	●
Nr. 19: "Design samlinger og komponenter, så de kan tåle gentagen anvendelse"	•	•	●	●
Nr. 20: "Tillad parallel adskillelse"	•	•	●	•
Nr. 21: "Giv identifikation af komponenttype"	•	•	●	•
Nr. 22: "Opbyg strukturer og bygningslayout med mål- og modulkoordinering"	•	•	•	●
Nr. 23: "Brug præfabrikation og masseproduktion"	•	•	●	●
Nr. 24: "Brug letvægtsmaterialer og komponenter"	•	●	●	●
Nr. 25: "Identificer samlingspunkter"	•	•	●	●
Nr. 26: "Lever reservedele og lager på stedet, til adskillelse"	•	•	•	●
Nr. 27: "Bevar oplysninger om komponenter og materialer"	•	•	•	●

Tabel 4. Guidelines for DfD og deres relevans i forskellige scenarier, oversat fra ⁵⁾

Opdeling af 27 guidelines i temaer

	Genanvendte materialer	Simplificer	Undgå giftige og farlige stoffer	Samme materiale	Identificer og bevar oplysninger	Samlinger skal kunne genanvendes	Undgå special design	Modulært design og standarder	Tillad parallel adskillelse	Nem adgang til samlinger	Håndtering komponenter
Nr. 1: "Brug genanvendte eller genanvendelige materialer"	x										
Nr. 2: "Minimer antallet af forskellige typer materialer"		x									
Nr. 3: "Undgå giftige og farlige materialer".			x								
Nr. 4: "Udfør dele, som ikke kan adskilles, af samme materiale"				x							
Nr. 5: "Undgå overfladebehandlinger af materialer"				x							
Nr. 6: "Identificer materialetyper"					x						
Nr. 7: "Minimer antallet af forskellig typer komponenter"		x									
Nr. 8: "Brug mekaniske og ikke kemiske samlinger"						x					
Nr. 9: "Brug åbne byggesystemer"							x				
Nr. 10: "Brug modulært design"								x			
Nr. 11: "Design for anvendelse af almindeligt værktøj – undgå specialfabrik"							x				
Nr. 12: "Adskil i bærende strukturer fra beklædning"									x		
Nr. 13: "Giv adgang til alle dele og samlinger"										x	
Nr. 14: "Tilpas komponenters størrelse til håndtering"											x
Nr. 15: "Lever midler til håndtering og placering"											x
Nr. 16: "Sørg for rimelige tolerancer til samling og adskillelse"											x
Nr. 17: "Brug et minimalt antal samlinger"		x									
Nr. 18: "Brug minimalt antal forskellige forbindelsesmetoder".		x									
Nr. 19: "Design samlinger og komponenter, så de kan tåle gentagen anvendelse"						x					
Nr. 20: "Tillad parallel adskillelse"									x		
Nr. 21: "Giv identifikation af komponenttype"					x						
Nr. 22: "Opbyg strukturer og bygningslayout med mål- og modulkoordinering"								x			
Nr. 23: "Brug præfabrikation og masseproduktion"							x				
Nr. 24: "Brug letvægtsmaterialer og komponenter"											x
Nr. 25: "Identificer samlingspunkter"										x	
Nr. 26: "Lever reservedele og lager på stedet, til adskillelse"											x
Nr. 27: "Bevar oplysninger om komponenter og materialer.					x						

Tabel 5 Oversigt over guidelines

Temaer

- **Genanvendte materialer**
- **Simplificer**
- **Undgå giftige og farlige stoffer**
- **Samme materiale**
- **Identificer og bevar oplysninger**
- **Samlinger skal kunne genanvendes**
- **Undgå special design**
- **Modulært design og standarder**
- **Tillad parallel adskillelse**
- **Nem adgang til samlinger**
- **Håndtering komponenter**



I tabel 5 er de 27 guidelines samlet i 11 overordnede temaer. I det næste afsnit gennemgås og eksemplificeres guidelines under disse temaer. Samtidig identificeres en række dilemmaer.



Guidelines og dilemmaer

Genanvendte materialer

Guideline nr. 1: "Brug genanvendte eller genanvendelige materialer"

En del byggevarer består allerede i dag af genanvendte materialer, fx visse isoleringsmaterialer, gipsplader og spånplader. Dertil kommer, at det skal overvejes om byggevarer kan genanvendes eller genbruges efterfølgende.

Når materialer skal genbruges, er det nødvendigt at de har en lang levetid og god holdbarhed overfor de relevante påvirkninger. Man skal være opmærksom på, om materialet er egnet for andre påvirkninger end de oprindelige. Levetiden bør ikke være afhængig af gentagne behandlinger med uønskede stoffer,

overfladebehandling eller lignende (se også nr. 5). Levetiden kan være afhængig af hensigtsmæssig indbygning, og et simpelt princip som tagudhæng kan forlænge holdbarheden af facadens materialer og komponenter.

Det bør også overvejes, om materialet kan genanvendes eller genbruges flere gange. Når mursten renses og genanvendes som mursten, vil de typisk slides for hver gang, og mørteldelen går i dag typisk til spilde eller downcycles. Der kan anvendes svage mørtler for at sikre fremtidig genanvendelse, men det kan også overvejes at nedknuse murværket og genanvende det som råmateriale til nye mineralske produkter.

Ekspanderet polystyren kan genanvendes som isoleringsmateriale ved at fræse det i små dele og opblande det med mineralsk binde-

middel. Dette produkt kan igen neddeles og opblandes, men mængden af bindemiddel, typisk cement, vil være stigende og isoleringsværdien må forventes at falde for hver genanvendelse (se også nr. 19).

Simplificer

Guidelines

- **nr. 2: "Minimer antallet af forskellige typer materialer"**
- **nr. 7: "Minimer antallet af forskellig typer komponenter"**
- **nr. 17: "Brug et minimalt antal samlinger"**
- **nr. 18: "Brug et minimalt antal forskellige typer af samlinger"**

Disse 4 guidelines handler overordnet set om det samme, nemlig at gøre konstruktioner og bygningsdele simple – mere homogene, og formålet er at gøre nedrivningsprocessen simple. Jo færre typer af materialer i bygningen, jo færre bortskaffelsesmetoder er der, og jo enklere forventes sorteringsprocessen at være. I moderne byggeri peger udviklingen dog den anden vej, idet mange års udvikling og optimering af konstruktioner og produkter har bragt et utal af materialer ind i byggeriet. Dette kan eksemplificeres med en gængs konstruktion, hulmuren:



Figur 2. En hulmur består foruden murværk af bagmur, som kan være et andet materiale, isoleringsmateriale, stålkomponenter i form af bindere og evt. konsoller, murpap og såkaldte TB-render i plast. Foto: Teknologisk Institut

I hulmuren er facademurværk fastholdt til bagmuren ved murbindere. De er indmuret i formuren og oftest støbt ind i bagmuren. Hertil kommer andre indbyggede komponenter i form af f.eks. konsoller, præfabrikerede overliggere med indstøbt armering, fugearmering etc., samt murpap, der er indmuret over vinduer og døre, ofte i kombination med TB-render i plast. Murpap findes desuden ved sokkel, og vulkaniserer ofte ved tryk under for- /bagmur til soklen. Alle disse komponenter og materialer kræver en stor demonterings- og sorteringsindsats. Det anbefales derfor at anvende hulmuren i bygninger, som

tiltænkes en lang levetid, idet hulmuren har god holdbarhed og kræver et minimum af vedligehold.

Udsortering af en nedrevet hulmur i de lovkrævede fraktioner er en udfordring, så den er bedst egnet til bygninger med forventet lang levetid. Men der findes alternativer i form af monolitiske byggeblokke til facaden, f.eks. af porebeton, tegl, eller tegl og glas-skum, som kan nedknuses til "Blandinger af materialer fra natursten, uglaseret tegl og beton" og udnyttes som råvare til nye mineralske produkter.

Undgå giftige og farlige materialer

Guideline nr. 3: "Undgå giftige og farlige materialer"

Dette burde være indlysende. I tabel 4 vurderes denne regel "ikke relevant" for komponentgenbrug og flytning af bygning. Dette kan muligvis forklares med, at de giftige og farlige materialer er tænkt at forblive i komponenten/bygningen og derfor ikke spredes. Teknologisk Instituts vurdering er dog, at denne guideline altid er relevant, da alle byg-

ninger på et eller andet tidspunkt når "end of life", eller i hvert vil dele af bygningen typisk blive renoveret eller nedrevet, således at materiale indeholdende giftige og farlige materialer i værste fald må deponeres. Farlige stoffer vil ofte findes i overfladebehandling eller i fuges- eller klæbematerialer, som binder komponenterne sammen, og vil derfor være vanskelige at udsortere. Tilstedeværelsen af giftige og farlige materialer nødvendiggør en mere omhyggelig sortering, som også fordyrer processen.

Specielt bør det derfor undgås, at giftige og farlige materialer indgår som en uadskillelig del af større komponenter, f.eks. som overfladebehandling, se også nr. 4 og 5 nedenfor.

Samme materiale

Guidelines

- *nr. 4: "Udfør dele, som ikke kan adskilles, af samme materiale"*
- *nr. 5: "Undgå overfladebehandlinger af materialer"*

Overfladebehandlinger kan typisk ikke adskilles fra underlaget, og bør derfor generelt undgås. Men overfladebehandlinger kan være nødvendige for at sikre holdbarhed, og ved at

vælge overflader af samme type – f.eks. mineralske overfladebehandlinger til mineralske byggematerialer – minimeres problemet.

Generelt forbedres muligheden for genbrug/genanvendelse, når kompleksiteten i komponenter og materialer reduceres (jf. også nr. 2 og 7). Principielt bør man derfor undgå kompositmaterialer, og tilsætning af fibre, som er af en anden type end grundmaterialet.

Som et eksempel, er bærende betonkonstruktioner et kompositmateriale bestående af beton og armering. Beton har en høj trykstyrke men en forholdsvis lav trækstyrke, og derfor er det nødvendigt at armere betonen, ofte vil armeringen dog ikke være nogen større hindring for udsortering og genanvendelse.

Beton i sig selv, består som minimum af cement, vand, sand og sten. Derudover kan der tilsættes forskellige mineralske tilsætninger, kemiske tilsætningsstoffer og fibre af plastik eller stål. De mineralske tilsætninger og de kemiske tilsætninger bliver en del af pastafasen og forventes derfor ikke at påvirke genanvendelsespotentialer. Fibrene kan derimod være en udfordring, hvis betonen skal genanvendes som tilslag i ny beton der ikke indeholder fibre.

Identificer og bevar oplysninger

Guidelines

- **nr. 6:** *"Identificer materialetyper"*
- **nr. 21:** *"Giv identifikation af komponenttype"*
- **nr. 27:** *"Bevar oplysninger om komponenter og materialer."*

Identifikation og dokumentation hjælper både til at kortlægge ressourcerne i en bygning/bygningsdel og til at planlægge nedrivning og sortering. Dette gælder selvfølgelig såvel materialer som komponenter, alt efter sorteringsniveau. For fuldt ud at kunne udnytte identifikation og dokumentation, bør oplysningerne være holdbare (nr. 27) og kunne genfindes helt frem til, at materialer eller komponenter sælges og genanvendes.

Relevansen er størst, når materialerne skal genanvendes individuelt, eller som komponentdele, mens det er mindre relevant, når materialerne forbliver som del af en komponent, hvor man teoretisk set kan nøjes med data for komponenten. Men denne situation er sjældent anbefalelsesværdig, idet det foretrækkes at der kan sorteres i rene materialer.

Flere metoder til permanent mærkning af materialer og komponenter er under udvikling eller allerede tilgængelige, så som RFID tags der anvendes i produktionen af betonelementer. BIM er også et værktøj til at bevare detaljerede oplysninger om bygningen og materiale. Teknologisk Institut har desuden afprøvet og testet en metode for tilsætning af sporbarhed i beton på konceptstadiet, med det formål at muliggøre effektiv og hurtig kortlægning af betonens tekniske kvalitet, også efter nedrivning og knusning.

Teknologisk Institut har desuden udviklet et bygningspas, hvor Teknologisk Institut har anbefalet centrale nøgledata, der altid skal være tilgængelige, hvis bygningspasset skal kunne bruges som en nedrivningsplan. Bygningspasset skal indeles efter bygningsdelenes funktion og levetid. Den bærende konstruktion har fx en lang levetid og er udsat for få ændringer gennem byggeriets levetid, mens de indvendige dele af bygningen er udsat for en højere grad af udskiftninger jf. tabel 3, som bygningspasset optimalt set skal holde styr på.

Bygningspasset skal som minimum beskrive følgende:

- Konstruktionsdel: Overordnet beskrivelse som fx terrændæk, ydervæg, bærende vægelement. Oplysningen skal give et hurtigt overblik over hvilken konstruktion

der er tale om, så man let kan finde de relevante oplysninger.

- Mængder og dimensioner: Angivelse af mængder af de anvendte materialer er en vigtig oplysning som senere kan bruges i en affaldshåndteringsplan og i en resourcekortlægning. Hvis materialerne skal genbruges er det vigtigt at vide, hvilke dimensioner, der skal arbejdes med.
- Placering: Hvor materialerne i byggeriet er placeret er vigtigt i forbindelse med reovering og nedrivning. De genbrugelige materialer og de skadelige stoffer kan lokaliseres og derved håndteres mere effektivt.
- Materialetype: Angivelse af materialetype fx beton, glas eller træ
- Produkttype: Det er vigtigt at kunne identificere det specifikke produkt i form af producentnavn og et entydigt produkt-nummer. På den måde kan man altid gå tilbage og finde produktet igen og dets specifikationer.
- Skadelige stoffer: Da skadelige stoffer er svært håndterlige i dagens byggeri er det vigtigt at vide hvilke stoffer der bliver bygget ind i byggeriet.
- EAK-koder: Oplysninger om affaldskoder (EAK koder, der kan angive om der er tale om farligt eller ikke farligt affald) findes ofte i produktbeskrivelser. Dette er en ret central information i forhold til senere

affaldsanmeldelser.

- Returordninger: Hvis produktet har en tilbagetagningsordning er det vigtigt at oplyse.

Samlinger skal kunne genanvendes

Guidelines

- **nr. 8: "Brug mekaniske og ikke kemiske samlinger"**
- **nr. 19: "Design samlinger og komponenter, så de kan tåle gentagen anvendelse"**

Mekaniske samlinger er f.eks. skruer, splitter, møtrikker og bolte, som bør fortrækkes frem for søm og bindemidler, fx lim, som ikke kan opløses.

Den mekaniske samling forurener ikke de materialer som samles, og kan i sig selv genanvendes. Kemiske samlinger, typisk lim og fugematerialer, er dels vanskelige at afrense komplet, og kan i sig selv ikke genanvendes. Samlingerne skal holde til at blive skilt ad uden at gøre skade på materialet, så det kan genbruges. Selve samlingerne skal også genanvendes/genbruges. Et vigtigt aspekt er, hvor hurtigt man kan samle og adskille igen, samt hvilken type værktøj, der kan anvendes til at samle og skille ad, se også nr. 11.

Eksempler på typiske anvendte kemiske samlinger:

Mørtlen i murværk kan betragtes som en kemisk samling mellem mursten. Mørtlen kan ikke genanvendes, men mørtel og murværk kan designes, så genbrug af murstenene fremmes mest muligt, se mere i bilag 1. Betonelementer i bærende konstruktioner sammenstøbes med beton, hvilket besværliggør genbrug af hele elementer.

Skal beton fremover genbruges som hele elementer, er det nødvendigt at anvende generiske og reversible samlinger, dvs. samlinger med mulighed for at skille konstruktionsdelene fra hinanden uden beskadigelse af beton og armering. Udviklingen af dette er i gang.

Undgå "specialdesign"

Guidelines

- **nr. 9: "Brug åbne byggesystemer"**
- **nr. 11: "Design for anvendelse af almindeligt værktøj – undgå specialfabrik"**
- **nr. 23: "Brug præfabrikation og masseproduktion"**

Åbne byggesystemer er sådanne, som kan leveres og serviceres af flere producenter og leverandører. Det forudsætter, at dokumen-

tation om byggesystemer og elementer er tilgængelige, og at komponenter kan udskiftes uafhængigt af de andre dele. Det forudsætter igen tilgængelige og fleksible samlinger (nr. 13, nr. 20). Åbne byggesystemer er ikke nødvendigvis standardiserede, når blot der er adgang til information om systemet, og det ikke er beskyttet af patenter eller lignende. Men hvis systemet er højt specialiseret (se også nr. 11), er det ikke sandsynligt, at det er markedsomt attraktivt for andre leverandører at byde ind, hvilket vil virke hæmmende for genanvendelsen.

For at åbne byggesystemer reelt er åbne for markedet, må de være standardiserede. Fordelen ved præfabrikation i relation til DfD ligger primært i en forudsætning om, at opnå en stor del præcision og mindre tilpasning på byggepladsen. Gennemprøvede systemer, som er masseproducerede, kan også med større sandsynlighed genanvendes, jf. nr. 9, 10 og 22. Præfabrikation minimerer generelt spild på byggepladsen.

Modulært design og standarder

Guidelines

- **nr. 10: "Brug modulært design"**

- **nr. 22: "Opbyg strukturer og bygningslayout med mål- og modulkoordinering"**

Modulært design opfattes ofte som byggeri med ensartede standardelementer i form af en legoklods-opbygning. Men i virkeligheden er modulært design en effektiv og til tider lidt glemt metode at sikre åbne byggesystemer (se nr. 9).

Det forudsætter i virkeligheden kun mål- og modulkoordinering, så elementer passer sammen. Der blev især arbejdet med dette i 1970'erne og et par årtier frem i Danmark, i den samme periode hvor elementbyggeriet vandt frem og produktiviteten i en kortere periode steg i byggeriet. Dengang tænkte man ikke i genanvendelse, men i mass customization og effektivitet.

Det vurderes, at principperne for modulært design vil have et stort potentiale inden for DfD, hvis det implementeres i standardiseringsarbejdet.

Tillad parallel adskillelse

Guidelines

- **nr. 12: "Adskil i bærende strukturer fra beklædning"**
- **nr. 20: "Tillad parallel adskillelse"**

Disse guidelines henviser til opdelingen efter levetid i bærende konstruktioner, klimaskærm, installationer og planløsning jf. tabel 3. En sådan opdeling vil gøre det muligt at udskifte eller opdatere dele med en kortere levetid, og disse guidelines er derfor især relevante, når man tilstræber en lang levetid for hele bygningen som sådan, og en god udnyttelse af f.eks. tunge bærende konstruktioner i beton eller stål, som har lang levetid i forhold til f.eks. facadeelementer.

Nem adgang til samlinger

Guidelines

- **nr. 13:** "Giv adgang til alle dele og samlinger"
- **nr. 25:** "Identificer samlingspunkter"

Det lyder banalt, men glemmes alligevel ofte. Det har i mange år været en dyd at skjule samlinger og installationer især, og der skal fremover tænkes i nye arkitektoniske dyder (se også nr. 12 og nr. 20), hvis demontering skal faciliteres med nem adgang til samlinger. Installationer føres gerne i skjulte rør, under gulve i etageadskillelser og lignende. Det kunne være en spændende udfordring for arkitekter at gøre samlinger og installationer til en synlig attraktiv del af arkitekturen.

Håndtering af komponenter

Guidelines

- **nr. 14:** "Tilpas komponenters størrelse til håndtering"
- **nr. 15:** "Lever midler til håndtering og placering"
- **nr. 16:** "Sørg for rimelige tolerancer til samling og adskillelse"
- **nr. 24:** "Brug letvægtsmaterialer og komponenter"
- **nr. 26:** "Lever reservedele og lager på stedet, til adskillelse"

Disse guidelines fokuserer alle på håndtering og montage. Det må antages, at der skal anvendes mindst samme grej når der skal adskilles, som ved montagen. Det vil for de fleste byggeriers vedkommende være urealistisk at undgå forskellige typer af løftegrej, da kun meget små komponenter, under 12 kg, i dag må løftes af én person.

Det anbefales at tænke såvel på demontage som montage, når byggeprocessen planlægges. Undgå at der skal anvendes meget specielle typer af grej til montagen, som ikke kan påregnes tilgængelige om 20-50 år etc. (nr. 11).

Opsamling på guidelines

Guidelines er konkrete "gode råd" til at fremme DfD og minimere affald. I gennemgangen ovenfor er nogle fremhævet lidt mere end andre, og de har forskellig relevans for forskellige typer af bygninger og byggesystemer. Guidelines genfindes i 10), udkast til en standard for Design for disassembly and adaptability", hvor de er yderligere uddybet og begrundet.

Ud over at anvende guidelines direkte under planlægning og projekter samt udvikling af materialer og produkter, så kan de også anvendes til at evaluere et givent projekt. Ved at gennemgå projektet systematisk, f.eks. for hver bygningsdel, så kan man konstatere, hvilke guidelines der er overholdt. Man kan derved få en kvantificerbar indsigt i, om et givent projekt lever op til Design for Disassembly, men det kræver, at der udvikles en metodik.





”

De 5 mest betydende enkeltfaktorer for succes for DfD er:

1. Bedre uddannelse af professionelle i design af bygningens demontering (eller DfD)
2. Giv flere point for demonterbarhed i bedømmelse af bæredygtighed (som f.eks. DGNB)
3. Lovgivning, som gør det til et krav at have en plan for demontering af bygningen, i forbindelse med at der gives tilladelse til byggeriet
4. Offentlig lovgivning skal sætte mål for materialegenindvinding og genbrug
5. Tidlig involvering af professionelle nedrivere, i forbindelse med design af bygningen



Succeskriterier og udfordringer

Succeskriterier for Design for Disassembly

I afsnittet om guidelines, ser vi eksempler, som kan fremme DfD, eller som ligefrem er forudsætninger for DfD. Men det er ikke vurderet, hvilke der er de mest kritiske for implementering af DfD. Det undersøgte man i et projekt i UK i 2017.

I projektet "Critical succes factors for diverting end-of-life waste from landfills" 3), fra 2017, har forfatterne foretaget en større undersøgelse i byggebranchen i UK, for at identificere kritiske succeskriterier for DfD. Der er først foretaget et litteraturstudie, for at få inspiration til at definere succesfaktorerne. Herefter er der foretaget et antal kvalitative interviews med parter i byggebranchen, og på grundlag af dette er der designet en spørgeskemaundersøgelse. I alt 59 svar var brugbare, og respondenterne repræsenterer

alle professionelle led i kæden (undtagen byggherre), inklusive affaldsmodtagere. Alle havde flere års erfaring og alle er fra UK.

Respondenterne er blevet spurgt om, hvad der skal til for at undgå at bygge- og anlægsaffald havner på lossepladsen. Svarmulighederne var førnævnte faktorer baseret på de kvalitative interviews, og der var mulighed for at markere vigtigheden af hvert forslag. Der var i alt 38 faktorer.

Forslagene omfattede faktorer, som kunne opdeles i menneskelige faktorer, materiale-relaterede og designrelaterede faktorer. Nogle af faktorerne er tydeligt inspireret af DfD guidelines i bl.a. 5), som ses i tabel 7, men formuleret som "faktor".

DfD Guidelines i ⁵⁾	Suksesfaktorer i ³⁾
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Avoid toxic and hazardous materials</i> • <i>Separate the structure from the cladding for parallel disassembly</i> • <i>Design joints and components to withstand repeated use</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Avoid toxic and hazardous materials during design specification</i> • <i>Separate building structure from the cladding</i> • <i>Use joints and connectors that can withstand repeated use</i>

Tabel 6. Eksempler på sammenfald af guidelines og succesfaktorer for DfD

Statistiske metoder anvendtes herpå til at analysere svarene. Der anvendtes avancerede analyser for at validere svarene, og derpå rangeredes faktorerne efter betydning ifølge respondenterne, idet der både blev taget hensyn til antal svar og respondenternes vægtning af disse, inklusive en usikkerhedsanalyse.

De 5 mest betydende enkeltfaktorer for succes for DfD, som undersøgelsen peger på, er:

1. Bedre uddannelse af professionelle i design af bygningens demontering (eller DfD)
2. Giv flere point for demonterbarhed i bedømmelse af bæredygtighed (som f.eks. DGNB)
3. Lovgivning, som gør det til at et krav at

have en plan for demontering af bygningen, i forbindelse med at der gives tilladelse til byggeriet

4. Offentlig lovgivning skal sætte mål for materialegenindvinding og genbrug
5. Tidlig involvering af professionelle nedrivere, i forbindelse med design af bygningen

Målet for materialenyttiggørelse i EU er 70%. I Danmark har vi en materialenyttiggørelse på 87%, og der har gennem mange år været fokus på at øge kvaliteten af bygge- og anlægsaffald (www.vcøb.dk).

Herefter er faktorerne grupperet og gruppernes samlede betydning er analyseret ved en såkaldt faktoranalyse (exploratory factor analysis).

De 38 faktorer blev inddelt i 5 grupper, listet nedenfor som A til E hvor A er den mest betydende og E den mindst betydende gruppe:

- A. Tydelig og klar lovgivning og politik
- B. Kompetencer og design proces for adskillelse
- C. Design med henblik på at genindvinde materialer
- D. Design for genbrug af materialer
- E. Fleksibel planløsning

Af de 5 vigtigste succeskriterier kan de 3 findes i gruppe A, som omhandler lov og politikker, nemlig, succeskriterium nr. 2, 3 og 4.

Respondenterne peger altså i høj grad på lovgivning som det væsentligste succeskriterium. Med andre ord beder branchen om at få mere "pisk" (nr. 3 og 4) og "gulerod" (nr. 2), i form af krav og belønning (point) fra det offentliges side. Det kan tolkes således, at branchen ikke tror på markedet som driver af DfD.

De sidste 4 grupper B til E, handler i høj grad om designprocessen. Her kommer guidelines i fokus, sammen med behov for mere viden blandt aktører, samt at inddrage nedrivere

tidligt i design processen. Dette sidste forslag er ikke set umiddelbart i de andre guidelines, og fremkommer formentlig fordi nedrivere var en del af respondenterne! Ingen tvivl om at de kan bidrage med væsentlig viden om, hvor skoen trykker.

Undersøgelsens resultat og konklusion er altså, at lovgivning og politik, sammen med tekniske kompetencer inden for design og indvinding af ressourcer, er de vigtigste succeskriterier for DfD og dermed minimering af affald fra byggeri.

Vurdering af resultat og konklusioner i "Succeskriterier for DfD"

Undersøgelsen³⁾ besvarer spørgsmålet "hvad er de kritiske succesfaktorer for DfD?" ud fra det, branchefolk peger på, når de bliver præsenteret for et antal muligheder, fundet i litteraturen. Deltagerne i undersøgelsen har desuden drøftet og tilpasset svarene i fokusgrupper, og den statistiske databehandling filtrerer usikkerheder i svarene.

Det skaber ikke generaliserbar viden, men giver et indblik i nogle kontekstbestemte forhold. Resultatet er til en vis grad styret af, hvilke svarmuligheder branchefolkene er

blevet præsenteret for i undersøgelsen.

På baggrund af Teknologisk Instituts erfaringer og debatten i Danmark er det påfaldende, at ingen nævner noget om, at "det skal kunne betale sig", altså at markedskræfterne er en vigtig forudsætning for succes.

Det er desuden interessant, at nedrivernes rolle er kommet relativt højt på listen over kritiske succesfaktorer (nr. 5 på bruttolisten af 38 faktorer). Formentlig fordi de er blevet spurgt. På den anden side er det påfaldende, at ingen nævner bygherrens rolle – måske fordi bygherrer ikke var en del af panelet.

Bygherren må som køber af bygninger anses som den primære markedsdriver, men bygherre og markedskræfter er ikke en tydelig succesfaktor, og DfD drives ifølge undersøgelse ikke af markedskræfter.

Helt overordnet peger respondenterne altså på behov for:

- Lovgivning – både krav og belønning "nogen skal sige til os, at vi skal gøre det"
- Designværktøjer og viden, som understøtter DfD "vi skal også vide hvordan"

Det kan være nærliggende at påberåbe sig noget lovgivning for at få noget til at ske. Og det er da også erfaringen fra andre ændringer i såvel byggebranchen som generelt i samfundet. Uden krav i Bygningsreglementet til bygningers energibehov var der næppe udviklet lavenergibyggeri i Danmark.

Dette er også anbefalingen fra den danske byggebranche, som i ⁸⁾ anbefaler at indføre bæredygtighedsklasser i BR, først som en frivillig standard, herefter gradvist som krav. Regeringens Advisory Board om cirkulær økonomi anbefaler det samme og supplerer med anbefalinger om standardisering inden for området⁹⁾.

I de næste afsnit behandles markedskræfter og standardisering som drivere for DfD.

Tekniske og markeds-mæssige udfordringer

Undersøgelsen i ³⁾ peger på, at ud over lovgivning så er designløsninger det væsentligste succeskriterium for DfD. For nærmere at undersøge dette forhold, sammenholdes succeskriterierne og designløsningerne i dette afsnit med de udfordringer, der er ved at genanvende nedrevne bygninger i dag.

En række af disse udfordringer, som Teknologisk Institut er blevet opmærksomme på, er således opstillet i tabel 7.

Når man sammenligner udfordringerne i tabel 7 med guidelines for DfD, fremgår det at guidelines primært adresserer venstre kolonne med anbefalinger som:

- Samlinger skal være demonterbare, simple, anvendes flere gange osv.
- Hold materialer rene, undgå overfladebehandling og uønskede stoffer
- Bevar dokumentation for materialer

Mens udfordringerne i højre kolonne, som handler om marked, i mindre grad er omfattet af DfD guidelines.

Ved at således opdele udfordringerne i tekniske udfordringer og markeds-mæssige do., afsløres det dermed, at set i forhold til genanvendelsen i fremtiden og dens problematikker, er DfD guidelines alene ikke fyldestgørende – de er tekniske, og løser ikke markedsproblemer.

I dag ligger hovedvægten af genanvendelse på "rene" materialer frem for komplekse elementer. Der har dannet sig en ny industri omkring handel med og oparbejdning af affald fra nedrivning af bygninger. Det skyldes givetvis en række af udfordringerne i højre kolonne: de er størst, hvis man ønsker at genanvende større, komplekse elementer, fordi det er mindre sandsynligt, at elemen-

Udfordringer ved nedrivning (i dag)	Udfordringer ved genanvendelse
<ul style="list-style-type: none"> • Samlinger er ikke demonterbare (kemiske, ikke mekaniske) • Miks af materialer i samme konstruktionselementer (f.eks. sandwichelementer i facade) • Ringe tilgængelighed • Malinger, overfladebehandlinger, forurening med uønskede stoffer • Værdi og kvalitet af materialer er ukendt 	<ul style="list-style-type: none"> • Er der nok materiale af den ønskede type og kvalitet til det nye projekt? • Flere leverandører, materiale af varierende kvalitet • Hvor langt væk fra skal det skaffes? Og hvornår kan det leveres? • Hvordan kan den krævede tekniske kvalitet dokumenteres? • Hvordan dokumenteres renhed ift. forurenende stoffer

Tabel 7. Udfordringer i dag ved udnyttelse af CDW, opdelt på nedrivning og genanvendelse (salg af nedrevet materiale).

ter af forskellig type kan anvendes sammen i samme byggeri. Hvis man i stedet udsorterer i rene materialer eller -typer, kan de blandes, når blot renhed og kvalitet dokumenteres.

Aktuelle eksempler på genbrug af materialer i rene fraktioner (niveau i affaldshierarki) er:

- Mursten, genbrugt som mursten (2a)
- Gulvbrædder, som kan lægges som nyt gulv (2a) eller bruges som vægbeklædning efter slibning (2b).
- Zinkbeklædning til facade fremstillet ud af nedtagne tagrender 1). (2b)
- Nedknust og sorteret beton som tilslag i nye produkter. (2c)
- Træ fræset i spåner og genanvendt i plader, (2c)

For disse eksempler gælder, at materiale fra forskellige bygninger relativt uproblematisk kan blandes. Der kan hermed opnås store, relativt ensartede mængder, og når materiale kan hentes fra flere kilder, kan transporten minimeres. Ved at fremstille nye produkter, opnås fuld frihed for arkitekten (eller byggematerialeproducenten) til at udvikle design og bygning med nye udtryk som fortæller om oprindelsen. Variationer i råmaterialerne kan endda give æstetisk attraktive variationer i slutproduktet.

Ved at designe, så der kan demonteres til rene materialer, kan de fleste af udfordringerne nævnt i højre kolonne løses. Herved understøttes det marked, som er under udvikling, fordi de markeds-mæssige udfordringer i højre kolonne løses. Tilbage står nogle udfordringer med at dokumentere den tekniske kvalitet og renhed i forhold til uønskede stoffer, som indtil der er indført sporbar dokumentation på materialerne, må løses af producenterne af de nye råvarer og varer. Der er uomtvistelige fordele ved at genbruge i større præfabrikerede elementer. Spildet er simpelthen mindre, når der er færre grænseflader. Det gælder ikke mindst, når elementet monteres første gang, idet der ikke kræves tilpasning på byggepladsen.

Men der er udfordringer i efterspørgsel på det genbrugte element. Sandsynligheden for at en fremtidig byggherre lige står og mangler netop dette element, er ringe. Det ligger i den måde vi i mange år har tænkt byggeri, designet og bygget på, hvor der er lagt vægt på det individuelle og originale design.

Bygherrer og arkitekter foretrækker ofte at sætte et individuelt præg på byggeriet, og selv når der bygges med systemer, er det som regel unikke systemer, de selv har udviklet.

Den dag, de gamle systemer skal genanvendes, rejser der sig nogle centrale spørgsmål:

1. Er det attraktivt at anvende andres (gamle) systemer?
2. Kan man finde nok af en vare/system, til at det kan udnyttes i et nyt byggeri?
3. Er systemkomponenterne aktuelle og "gode nok" til byggeriet om 20 – 50 – 100 år?

Ad 1: Arkitektonisk - der vil helt sikkert være nogle, som vil elske den udfordring. Sikker ikke uden at tilføje eget særpræg og lave lidt om – det koster lidt, men er elementerne tilgængelige, skal de såmænd nok blive brugt. Problemet er om mængden passer. Hvis der er for lidt, kan der selvfølgelig suppleres med nyproducerede do., men det er ikke sikkert producent/produktionslinje stadig eksisterer.

Ad 2: Der er stadig tale om en lang række individuelle systemer, og at finde dem og udnytte dem, vil formentlig være en lige så stor udfordring, som at finde mursten i dag, hvis ikke der sker en udvikling inden for registrering – børser – handel med sådanne elementer.

Ad 3: Se det er det store spørgsmål. Det er måske smart at kunne genbruge et fikst og færdigt facadeelement – men hvad hvis det ikke lever op til fremtidens krav? Hvordan undgår vi at genbrug af elementer fastholder byggeriet på et tidligere udviklingstrin. Dilemmaet er, at alle elsker at udvikle systemer – ingen gider anvende andres.

For at markeds kræfter skal kunne drive DfD, kan man da opstille nogle kriterier:

- A. Det skal være attraktivt for bygherrer at købe en bygning, som kan adskilles og/eller er bygget af tidligere anvendte materialer og/eller komponenter.
- B. Der skal være penge at tjene på at anvende materialer og komponenter 2. og 3. gang, dvs. de skal være billigere end nye, eller kunne sælges til en højere pris end nye.
- C. Tilgængelighed af tilstrækkelig mængde af produkter/materiale af samme type til et givet byggeri.

For at A er attraktivt, så skal bygherre kunne kvantificere fordelene, og gerne økonomisk, mens det i dag primært er signalværdien, der

driver bygherrens investering. Det er meget svært, for ikke at sige umuligt, at kvantificere værdien af salg af elementer eller materiale fra en bygning i fremtiden, men prognoser for fremtidig knaphed på ressourcer kan underbygge, at materialer og komponenter har en værdi i fremtiden.

For at B skal realiseres, så skal det være billigt at indvinde genbrugsmaterialer. Det kan fremmes ved at følge guidelines, som fremmer adskillelse til rene materialer, og dermed gør det nemmere og billigere at nedrive og sortere. I dag viser eksemplerne, at byggevarer baseret på genanvendte ressourcer ikke er billigere end byggevarer baseret på jomfruelige råvarer, fordi indvinding og sikring af kvaliteten er dyrere ved genanvendelse. Hvis markedskræfter alene skal drive processen, så vil B ikke realiseres før knapheden på res-

sourcer er indtruffet, og priserne på råvarer stiger af den grund.

For at C kan realiseres, er den enkleste metode at sikre udsortering i så rene materialer som muligt, som kan blive til råmaterialer for nye produkter.



An aerial night photograph of a city, likely Copenhagen, showing a dense network of streets and buildings with lights reflecting on the water in the harbor. The image is dark with warm yellow and white lights from the city.

11

Standard modulmål og standardisering af strukturer og fremgangsmåder er en lige så vigtig forudsætning som reversible samlinger og dermed for DfD, for dels at kunne genbruge større præfabrikerede enheder og for at fremme en enklere og sikrere demonterings- og sorteringsproces ved nedrivning.



Standardisering

Standardisering: Udfordringer og muligheder

I guidelines for DfD anbefales det at designe modulært og anvende åbne systemer. En forudsætning for dette er, at der findes fælles standarder, som det også anbefales af Advisory Board for CRØ i 9).

Byggeriet i Danmark har i årtier været præget af individuelle design og løsninger. Det har ofte været påpeget, at dette var roden til lav produktivitet i byggeriet – ved sammenligning med bilindustrien, er manglen på "mass customisation" stadig iøjnefaldende.

Udviklingen under byggeboomet i 60'erne og 70'erne (med kransporsarkitekturen) gik i retning af præfabrikation og modulbyggeri, for at opnå en produktiv industriel byggeproces med minimalt spild. Med standardisering af betonelementer til lejlighedsbyggeri blev der bygget i en fart. Senere blev disse byggerier opfattet nærmest som skamstøtter, og der er blevet rynket på næsen af såvel arkitektur

som kvalitet. Dette har skabt en barriere for standardisering af elementer og systembyggeri i Danmark.

Men principperne som blev udviklet – modulbyggeri, præfabrikation og industrialisering – kan vise sig at være forudsætningen for at kunne genanvende præfabrikerede elementer. Der blev udviklet standarder for modulmål, som er anvendelige i dag.

Standard modulmål og standardisering af strukturer og fremgangsmåder er en lige så vigtig forudsætning som reversible samlinger og dermed for DfD, for dels at kunne genbruge større præfabrikerede enheder og for at fremme en enklere og sikrere demonterings og sorteringsproces ved nedrivning. Med nye digitale teknologier og digitale fabrikationsmetoder forventes det dog også, at DfD i fremtiden kan tænkes ind i ikke-standardiserede konstruktionselementer.



Standardisering er også en forudsætning for at stille krav om, at bygninger og materialer skal kunne genanvendes, idet der er behov for et standardiseret bedømmelsesgrundlag for at kunne afgøre, om kravene er overholdt.

Standardisering af Design for Disassembly og metoder

Dette vigtige standardiseringsarbejde pågår i regi af ISO, den internationale organisation for standardisering. Der er udarbejdet et forslag til standardisering med principper, krav og vejledning for at opnå en højest mulig grad af genanvendelse og genbrugelighed af såvel selve bygværket som de anvendte materialer. ISO/DIS 20887:2019 10) er sendt i høring fra 31. januar 2019 og til 25. april 2019. Forslaget adresserer en række af de emner, som er beskrevet i denne håndbog, og giver vejledning til at designe bygninger, så de er anvendelige til flere formål, for at forlænge deres levetid, samt udmønter en række af de guidelines, som også ses i afsnit 6, som krav til design. Forslaget består primært af principper og vejledning, og sætter ikke egentlige krav til

f.eks. moduldesign, som i en række danske standarder fra perioden frem til år 2000:

- Dansk Byggeskik. Modul og montagebyggeri, Henrik Nissen, Lærebøger, 1975
- DS 1010.1:1975 Modulkoordinering for byggeriet. Terminologi
- DS 1010.2:1975 Modulkoordinering for byggeriet. Principper og regler.
- DS 1011.2:1982 Modulkoordinering for byggeriet. Planlægningsmoduler
- DS 1011.3:1984 Modulkoordinering for byggeriet. Dimensioner på modulære komponenter
- DS 1041:1968 Byggeblokke. Mål og forbandter
- DS 1048:2000 Normalmurværk og modulprojektering

En kombination af guidelines og modulkoordinering kunne fremme en fremtidig salgbarhed af såvel materialer som komponenter.

Standardisering af bedømmelse af potentiale for genanvendelse

I 8) beskrives et forslag til frivillige bæredygtighedsklasser i Bygningsreglementet.

Forslaget henviser til en række eksisterende bedømmelsessystemer som f.eks.

- EU Level(s) *)
- DGNB **)
- LCA (livscyklusvurderinger)

*) EU Level(s): Level(s) er af EU tænkt som en fælles europæisk tilgang til et indikatorsystem med angivelse af dokumentation for vurderingen af bygningers bæredygtighed. Level(s) bygger på eksisterende Europæiske standarder, hvor indikatorer og metoder stammer fra CEN/TC350.

**) DGNB-DK Certificering: DGNB er en frivillig certificeringsordning med tredjeparts auditering, som er udviklet af det tyske Green Building Council som et andengenerationssystem, der tilgodeser flere dimensioner af bæredygtighed end de andre certificeringssystemer.

Mens det i 8) erkendes, at f.eks. DGNB er et meget omfattende bedømmelsessystem, foreslås der en række kriterier for bedømmelse, hvor der imidlertid ikke i dag foreligger systemer eller standarder. Det gælder et kriterium som "cirkulær materialeanvendelse". Her kun-

ne det være en mulighed at anvende de før omtalte guidelines, evt. i den form de fremgår i 10) og på baggrund af guidelines udvikle et bedømmelsessystem. Systemet kunne bestå i dels en rating af hver guideline i forhold til et konkrete byggeprojekt efter relevans, og derpå en bedømmelse af om guideline var fulgt eller ej. Dermed kan der konstrueres et pointsystem, som kan holdes rimelig enkelt.



”

Genbrug af større elementer minimerer spild, men kan være udfordrende i forhold til at elementerne er forældede, teknisk og designmæssigt.



Konklusion og anbefalinger

Konklusion og anbefalinger

Som princip er DfD et positivt virkemiddel til at nedbringe mængden af affald fra byggeriet. Men der er som nævnt nogle store dilemmaer involveret i direkte genbrug af byggematerialer. Genbrug af større elementer minimerer spild, men kan være udfordrende i forhold til at elementerne er forældede, teknisk og designmæssigt. Som beskrevet tidligere, er det svært – nærmest umuligt – at genbruge et termovindue fra 1970'erne direkte som nyt vindue. Hvis større elementer skal genbruges i fremtiden til samme formål, så fordrer det en grad af standardisering af elementer og samlinger, som brugernes krav om individualitet modsiger.

Fordelene ved større elementer kan udnyttes, hvis selve elementet kan demonteres og opdateres/genbearbejdes på fabrik – for fortsat brug i samme byggeri. I første omgang

er det da et mindre problem, at elementet er komplekst og omfatter flere materialer, idet det forudsættes at genbearbejdning sker på fabrik eller værksted, hvor der er gode muligheder for at håndtere en mere kompleks opbygning. Men på lang sigt, bør også større elementer også let kunne adskilles i rene materialer, eller i hvert fald i grupper af materialer.

Derfor står det ret klart, at den størst mulige andel af genanvendt materiale, fremmes ved at muliggøre demontering i "rene" materialer, idet det er her, der er størst potentiale for et kommercielt marked.

Udsortering i materialer og oparbejdning til nye produkter eller råmaterialer understøtter, at flest mulige projekter kan anvende materialet, og dermed at de kan sælges.

Men for at understøtte at det sker, er der behov for en række tiltag inden for lovgivning, markedsmekanismer og standardisering.

Praktiske anbefalinger for at fremme DfD

Der eksisterer flest eksempler på, at virksomheder har kunnet etablere en kommerciel forretning på basis af genanvendelse af rene materialer, dvs. oparbejdning af affaldsmaterialer til nye produkter, eller til råmaterialer. Det bør derfor så vidt muligt sikres, at bygning og bygningsdele kan adskilles i rene materialestrømme for at understøtte sådanne forretninger.

Brug især guidelines nr. 3, 4, 5, 8, 12/20, 13, 25.

For at øge værdien af genbrug og genanvendelse, bør information og dokumentation så vidt muligt være tilgængeligt i hele bygningens levetid, igennem nedbrydnings- og sorteringsprocessen, og helt indtil genanvendelsesprocessen. Brug især guidelines nr. 6, 21, 27.

Det kan ikke undgås, at der opstår en vis mængde spild ved nedrivning og reovering. Det anbefales derfor at designe bygninger med lang levetid. Nye bygninger designs til at have en forventet levetid på 50 år, men kan ofte stå i længere tid. Fleksibelt byggeri er her centralt, så anvendelsen kan ændres uden større ombygninger. Der vil dog altid være bygningsdele med forskellig forventet levetid. Derfor anbefales det at sikre mulighed for parallel adskillelse, dvs. de hurtigst opslidte eller forældede, skal kunne adskilles

uafhængigt af de længere levende dele. Brug især guidelines nr. 10, 11, 12, 13, 16, 19, 20 m.fl.

Brug byggesystemer med omtanke, især sådanne som er specielt udviklet til unikt byggeri, og overvej hvordan byggesystemet kan understøtte en fremtidig genanvendelse. Hvis der udvikles byggesystemer, så vær særlig opmærksom på guidelines nr. 7, 9, 10, 12, 16, 20, 22, 27.

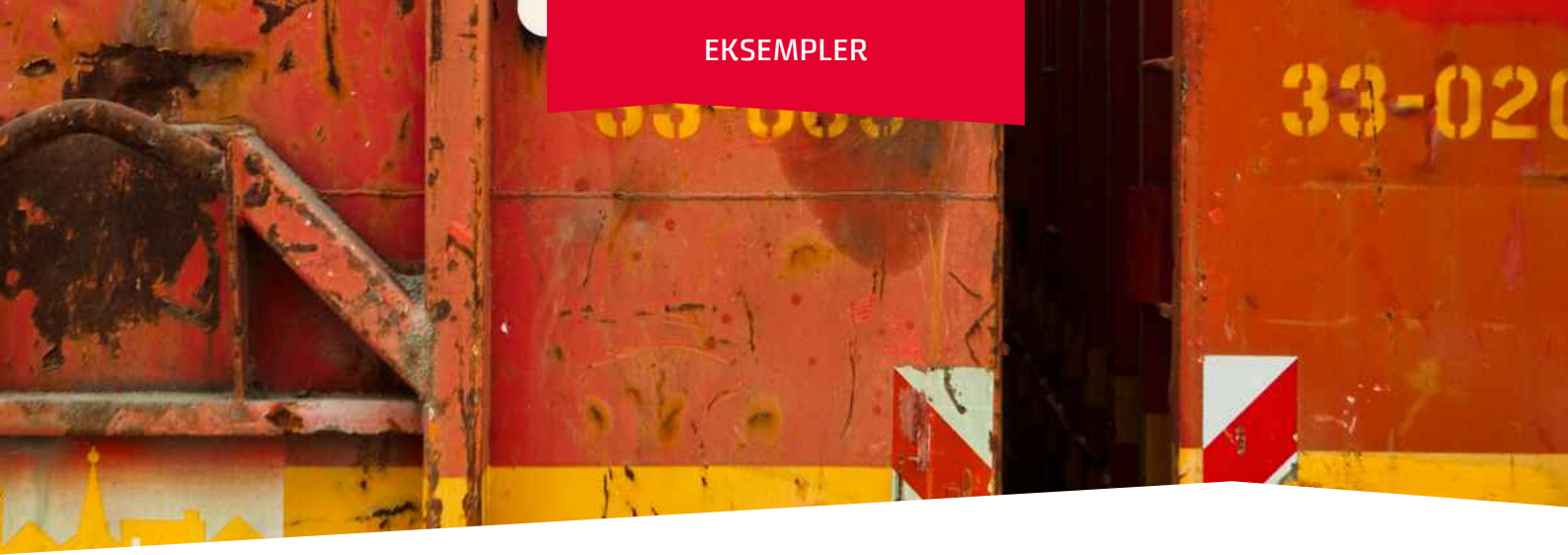
Standardisering bør fremmes, det gælder såvel af principper som modulkoordinering og systemer for bedømmelse af byggeprojekters potentiale for genanvendelse.







Eksempler



Eksempler

I dette afsnit beskrives og kommenteres nogle eksempler, som relaterer sig til forskellige niveauer for adskillelse:

- Optimering af bygningens levetid
- Genbrug af præfabrikerede bygningsdele og større elementer
- Genanvendelse af materialer og mindre komponenter
- Oparbejdelse af materialer til nye råmaterialer og produkter

Det er muligt – og anbefalelsesværdigt – at kombinere koncepterne. Specielt bør det sikres, at bygningen så vidt muligt kan adskilles i rene materialestrømme.

Eksempel 1: Optimering af bygningens levetid "genbrug af bygning"

Levetiden af en bygning afhænger af flere parametre:

- Bygningens formål, f.eks. bolig, industri eller forretning
- Bygningsdelenes holdbarhed og evne til at bevare de oprindelige egenskaber
- Ændrede krav til f.eks. komfort og energimæssig ydeevne
- Ændringer i anvendelse og behov mht. planløsning.

Levetid er altså ikke kun et spørgsmål om materialers og konstruktioners holdbarhed, men også om bygningsdesign som er robust over for ændret anvendelse, eller fleksibelt. For boliger vil ændringer i demografi og livs-

stil have betydning for boligenhedens anvendelighed. Der ses over tid ændring i størrelse på familieenheder, samt i krav til komfort, fordeling af rum. Køkken-alrum har f.eks. udkonkurreret adskilt spisestue og køkken i Danmark.

For at muliggøre opdatering af en bygning er det vigtigt at kunne adskille efter de forskellige deles levetid. Bygningen skal desuden være attraktiv og bevare sin økonomiske værdi. Arkitektur er derfor også en væsentlig parameter for lang levetid.

Den fremherskende udbudsprocedure med tildelingskriteriet "billigste pris" har indflydelse på holdbarheden. Det er de billigste materialer og de billigste løsninger der vinder opgaven. Driften bør i langt højere grad være en parameter ved udbud. Holdbarhed og fleksibilitet giver længere levetid og mindre forbrug - og dermed mindre spild.

Gode principper og vejledning vedr. bygningers levetid og anvendelighed findes også i ¹⁰⁾.

Nedenfor nævnes eksempler på materialer og konstruktionstyper, som passer godt til bygninger med lang levetid, samt betingelser for, at levetiden kan udnyttes.

Murværk

Murværk og tegltage har som udgangspunkt en exceptionelt lang levetid, op til flere hundrede år. Dette kræver dog, at vedligeholdelsen er i orden.

Muremørtel og pudsemørtel har typisk ikke så lang levetid. Man regner med 20-50 år for mørtelfuger i murværk. Det er de yderste 10-20 mm af mørtelfugen som udskiftes eller repareres med udkradsning og efterfugning.

Ligeledes må udvendigt puds løbende repareres og vedligeholdes. Det er væsentligt at forstå, at tyndpuds (filtsning, vandskuring og andre betegnelser) ikke forlænger levetiden af murværk, snarere tværtimod, da fugtindholdet i murværket øges. Tykpuvs eller 2-trins puds vil derimod beskytte murværket.

Levetid for beton

Beton har en god holdbarhed og generelt en lang levetid. Den forventede levetid for beton er dog afhængig af miljøet hvori betonen eks-

poneres. Beton som anvendes i tørre, frostfrie miljøer, som f.eks. indvendige konstruktioner i en bygning, vil have en meget lang levetid, der ofte vil overstige den forventede brugstid af bygværket. Selvom beton, som f.eks. eksponeres for en kombination af frost/tø og salte, kan designes til at have en lang levetid, forventes den stadig at være kortere end den for beton anvendt indendørs.

I Danmark skal beton til bærende konstruktioner, bl.a. overholde kravene i betonstandarden DS/EN 206:2013 og det tilhørende nationale anneks DS/EN 206:2018 DK NA. I standarden defineres forskellige eksponeringsklasser. Krav til betonsammensætninger og anvendte delmaterialer, vil afhænge af den pågældende eksponeringsklasse. Formålet er at sikre, at betonen designes, så den fornødne holdbarhed af materialet opnås. Når levetiden for en betonkonstruktion ophører, kan det således skyldes:

- betonens eller armeringens tilstand er forringet, f.eks. grundet armeringskorrosion
- æstetiske årsager
- endt levetid af bygværket, f.eks. grundet nedbrydning af andre byggematerialer, behov for ny anvendelse mv.



Figur 3. Capsule Tower i Tokyo. Foto: Raphael Koh

Eksempel 2: Genanvendelse af præfabrikerede bygningsdele og større elementer

I denne case gennemgås nogle eksempler på genbrug af bygningsdele eller større elementer. Konceptet er anvendeligt til om- og tilbygninger, ligesom moduler kan udtages og renoveres. I nogle tilfælde kan hele bygningen nedtages og flyttes.

Rumstore moduler af beton: Kisho Kurokawas Nakagin Capsule Tower

Et eksempel på en betonkonstruktion designet med henblik på adskillelse, er arkitekt Kisho Kurokawas Capsule Tower opført i 1972. Det er en prototype for bæredygtigt arkitek-

tur. Hver kapsel er et modul, som kan tilkobles bygningens centrale kerne og erstattes hvis nødvendigt. Bygningen er bygget i Tokyo og består totalt set af 140 kapsler, der kan stables og roteres i forskellige vinkler rundt om bygningens midte. Hver kapsel er tilkøbet bygningens betonkerne med kun 4 bolte, hvilket muliggør adskillelse. Hver kapsel består af 4 x 2,5 meter med mulighed for at koble flere kapsler sammen.

Der er tale om et ældre eksempel på præfabrikerede moduler, og disse moduler eller kapsler er næppe attraktive i dag. Dertil kommer et manglende vedligehold af bygningen som bl.a. har ført til kloakproblemer.

Der foreligger ikke oplysninger om, hvorvidt modulerne i sig selv kan adskilles og udsorteres. Men det forhold, at der er mange ensar-



Figur 4. Dome of Visions 3.0

Fotos: Søren Aagaard, Helle Arensbak og Atelier Kristoffer Tejlgaard

tede moduler og de nemt kan afmonteres fra bygningen, sandsynliggør at man kan systematisere en nedbrydning og udsortering.

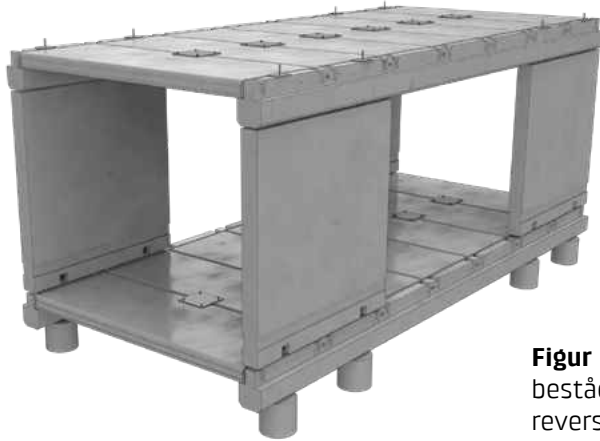
Konstruktionselementer af træ og CLT:

Dome of Visions

Dome of Visions er et byggekoncept oprindeligt udviklet af arkitekterne Kristoffer Tejlgaard og Benny Jepsen, NXT og NCC, der skal inspirere til nye boformer, undersøge fordele ved at bygge med et minimum af ressourcer og finde nye veje til bæredygtigt byggeri og materialeforbrug. Konceptet er udviklet ad flere omgange senest med versionen Dome of Visions 3.0, der er tredje generation af konceptet. Hele konstruktionen er designet så den kan skilles ad, flyttes og genopbygges.

Konstruktionen er forankret direkte i jorden uden fundament og uden brug af beton. Konstruktionen består af en transparent klimaskærm, opbygget som en kuppel over et træskelet. Træskelettet består af krumme stænger af limtræ samlet med laserskåret pladestål i knudepunkterne, der er 'gemt' i træet og dermed ikke er synlige. Under klimaskærmen findes huset, der er opbygget af CLT-elementer (krydslamineret massivtræ), der er modulære og flytbare. Der er sparet på husets materialer, fordi klimaskærmen beskytter det mod regnvej, vind og frost.

De præfabrikerede elementer kan adskilles og genanvendes helt ned til fundamentet. Det er næppe sandsynligt, at de kan kombineres



Figur 5. Et udsnit af et råhus bestående af betonelementer med reversible samlinger. Illustration: Peikko

med andre typer elementer, men i sig selv ser elementerne ud til at bestå af homogene materialer (træ), så demontering muliggør dermed også sortering i rene materialer.

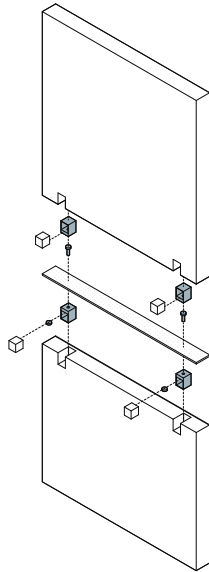
Bærende betonelementer: Circle House

Circle House projektet består af 60 almene boliger projekteret efter principperne i cirkulær økonomi. Projektet er opdelt i to dele, herunder et udviklingsarbejde, hvor koncepterne udvikles og afprøves, og opførelsen af boligerne i Lisbjerg.

Målet med projektet er bl.a. at 90% af boligernes materiale kan genanvendes, herunder også bygningens bærende betonelementer, som er designet med reversible, mekaniske

samlinger. Alle samlinger er udført i rustfrit stål, som ved samling indstøbes i en kalkmørtel, som efterfølgende kan fjernes ved højtryksspuling. Circle House er opbygget således, at betonelementerne ikke blot kan genanvendes, når bygningen nedrives helt, men så det også – til dels – er muligt at adskille og ombygge i bygningens levetid, idet facaderne også er designet som demonterbare elementer.

Selvom der her er tale om store elementer, så er systemet meget fleksibelt og det vurderes at elementerne reelt vil kunne genanvendes i andre bygninger. Den mekaniske samling er udviklet af den finske betonelementproducent Peikko, som allerede havde produkter



Figur 6. Eksempel på en reversibel samling mellem to vægelementer eller mellem fundament og vægelement. Illustration: Peikko

med mekaniske samlinger, som med få justeringer er blevet reversible.

Præfabrikerede moduler i krydsfiner: Det printede hus

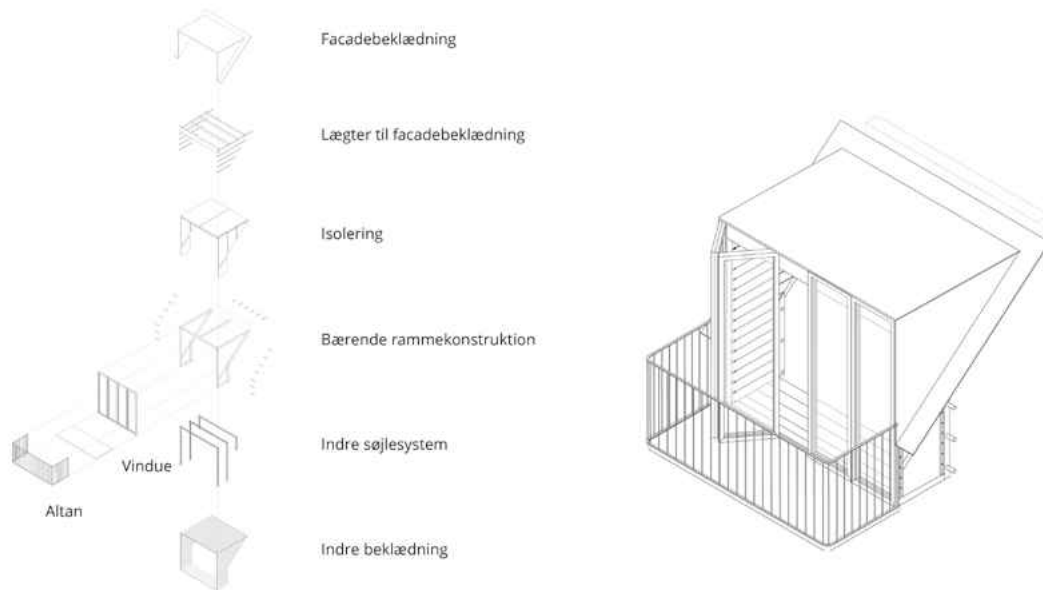
Det printede hus er et byggekoncept, hvor et hus designes digitalt, opbygget efter legoklodsprincippet af ensartede, men dog individuelle strukturer. Strukturen er opbygget af kasser produceret af krydsfiner, der er nøjagtigt tilpasset hinanden. Printningen består i at alle komponenter til husets struktur – altså de individuelle krydsfinerplader – bliver



Figur 7. Fotos af Det Printede Hus
Fotos: EEN TIL EEN Arkitektur og Byggeri

'printet', dvs. fræset ud med en CNC-fræser. Disse samles så til kasser, der nummereres ifølge tegningen til huset. Grundstenene til huset er således ensartede, men designet kan varieres i det uendelige.

Konceptet betyder et meget effektivt ressourceforbrug, da der ikke er noget spild på byggepladsen. Huset kan samles med let og simpelt værktøj. Huset kan adskilles og delkomponenter kan udskiftes, eller hele konstruktionen kan flyttes.



Figur 8. Illustration af den demonterbare kvist, fra ¹⁾
Illustration: Krydsrum Arkitekter

Den demonterbare kvist: Krydsrum Arkitekter

Kvisten er tiltænkt tagreovering af ældre bygninger, og dens dimensioner er tilpasset de modulmål, som er typiske i ældre huse. Kvisten kan udformes af forskellige materialer, kan adskilles fuldstændig og udsorteres i rene materialer, og alle samlinger er tilgængelige. Læs mere i ¹⁾.



Figur 9. Fotos af ReciPlyDome
Fotos: KADK

Eksempel 3: Genbrug af materialer og mindre komponenter

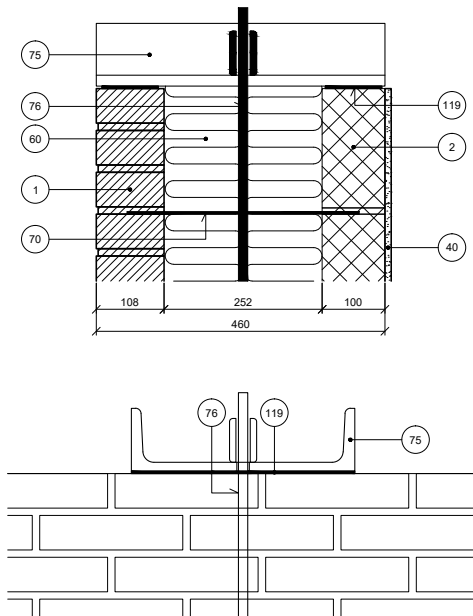
Komponenter af træ. ReciPlyDome

ReciPlyDome er et koncept udviklet af KADK i samarbejde med VUB og studerende fra DTU. Der er tale om et omkostningseffektivt, innovativt og bæredygtigt eksempel på, hvordan materialer kan bruges og genbruges fleksibelt og effektivt i byggebranchen. Kuplen består af 45 identiske stave af krydsfiner. Stavene er lette at producere og transportere. De er lette at samle og lette at adskille efter endt brug. Konstruktionen kan samles på et par timer af almindelige folk uden særlig erfaring med byggeri. Kuplen er 5 meter i diameter, og er en stærk konstruktion, der er tiltænkt gentagen brug til midlertidige formål. De enkelte komponenter i træ er samtidig udført i rene materialer.

Mursten og tagsten genanvendt som komponenter

Teglets (mursten, tagtegl) levetid er meget lang, op til flere hundrede år, og materialet er robust overfor klimapåvirkninger som UV-lys (ingen påvirkning), vand/fugt samt normalt også frost/tø. Uanset teglets lange levetid, så "slides" materialet af mange års vejrlig og frost/tø cykler, ligesom salte kan ophobes og påbegynde nedbrydningen. Et andet væsentligt forhold at tage i betragtning er, at ny anvendelse af gamle mursten kan betyde en helt anden klimamæssig påvirkning. Ved genanvendelse af ellers holdbare teglsten skal denne ændrede påvirkning tages i betragtning.

Genbrug af tagsten er ret ligetil, de kan nedtages, sorteres og vurderes for restlevetid. Udfordringen er at det er ret arbejdskrævende at håndtere, hvis teglstenene ikke bare kan dumpes i en container. Anvendeligheden af rent tegl er større end med mørtelrester,



Figur 10. Efterspændt murværk
Illustration: Teknologisk Institut

da de kan indgå i teglproduktion, anvendes til tennisbaner, gro-medium, mm.

Genbrug af mursten fordrer, at mørtlen kan renses af stenene. Mørtlen i sig selv kan ikke genanvendes, men kan blive til tilslag i nye mørtler af forskellige type. I dag anvendes i høj grad cementholdige mørtler til opmuring. Mekanisk afrensning er ikke muligt, da mørtlen er hårdere end stenene.

Når stenene er afrenset, er der yderligere behov for at kunne fastlægge deres egenskaber som trykstyrke, minutsug, format, vandoptagelse, holdbarhed mv. , før de kan genanvendes.

Koncepter til minimering af affald ved nedrivning af murværk

Anvendelse af svage (kalkbaserede) mørtler fremmer muligheden for at murstenene senere kan renses og genanvendes. Det er også muligt at mure med såkaldt svage mørtler, typisk mørtler baseret på kalk og/eller hydraulisk kalk. Mørtlerne er kendetegnet ved en langsom styrkeudvikling og en relativt svage slutstyrke end cementbaserede mørtler. De har også fordele i forhold til at være en smule "elastiske" således at man kan minimere antallet af dilatationsfuger. De svage mørtler anvendes kun begrænset i dag, fordi det er vanskeligt at opnå de fornødne bøjningstræk-

styrker i de slanke murede facader (i dag oftest ned til 80 mm).

Dette forhold kan imidlertid optimeres ved at påføre en lodret normalkraft – konceptet er udviklet allerede for flere år siden og kendt som "efterspændt murværk". Princippet er simpelt – en stålstang forankres i fundamentet og føres op gennem hulmuren. Ved hulmurens top anbringes et beslag, som overfører efterspændingskraften til hulmurens vanger. Der spændes op, når muremørtlen har opnået fornøden styrke.

Der er udført forsøg på Teknologisk Instituts murværklaboratorium med efterspændt murværk baseret på meget svage kalkmørtler. Der blev opnået gode mekaniske styrker. Efter forsøget kunne murværket nemt skilles ad.

Nye typer af beklædningstegl

Tegl fastgjort til underlaget med skruer eller fjederbeslag, omtrent som tagsten, og anvendt til såvel facade som tag. Genanvendelse af teglstenen er enkelt, da montagemetoden er demonterbar. Der er ingen mørtel eller fugemasse. Genbrug afhænger da af systemet, hvor individuel er stentype og underlag, kan man kombinere sten fra flere bygninger/leverandører?

Neddeling af komponenter i beton. Nordic built component reuse

Tegnestuen Vandkunsten har i et udviklingsprojekt arbejdet med 1:1 modeller af forskellige løsninger og forslag til genbrug af nedtagne bygningskomponenter, med det formål at udvikle metoder til at håndtere, organisere, udbyde og forhandle byggematerialer fra nedrivninger og renoveringer. Der har i projektet været arbejdet med metoder for genbrug af beton, hvor betonkonstruktionerne er blevet skåret til mindre komponenter og anvendt til byggesten i vægge eller til belægninger.

Mængden af konstruktionsbeton, hvis tekniske kvalitet egner sig til genbrug som belægningssten, vil formentlig være begrænset, idet en stor mængde af den eksisterende konstruktionsbeton er anvendt i passive eksponeringsklasser og derfor ikke nødvendigvis har en tilstrækkelig frostbestandighed.

Eksempel 4: Oparbejdelse af materialer til nye råmaterialer

Når nedrevet materiale udsorteres i rene materialefraktioner, er det muligt at oparbejde disse til råmaterialer, som kan bruges til at fremstille nye byggematerialer. Der findes i dag en del eksempler på dette, men det er selvfølgelig interessant, om de nye byggematerialer lige så let kan genanvendes igen.

Spånplader og andre pladematerialer

Spånplader kan fremstilles af genindvundet træ, som fræses i spåner passende for pladefremstilling. Krav til træets kvalitet og styrke er begrænset, hvilket mindsker kravene til sortering af træmaterialet og gør det nemt at anvende træet. Op mod tre fjerdedele af træet i danske spånplader kommer i dag fra genbrug af blandt andet kasserede møbler, spånpladerester fra møbelindustrien, træ fra nedbrydning, gamle paller og udtjente kabeltromler. Den sidste tredjedel af råvarerne er friskt træ i form af fraskær fra træindustrien eller udtyndingstræ fra skoven.

Spånplader kan genanvendes flere gange før de brændes (kilde: Kronospan ApS-Novopan Træindustri)

Nedknust beton og murværk

Nedknust beton og murværk nyttiggøres i stor stil som ubundne bærelag under veje og pladser. Det er dog også teknisk muligt at anvende nedknust beton som nyt tilslag (genanvendt tilslag) til beton (genbrugsbeton), men udfordringen er ofte at sikre renhed af tilslaget, samt at producere både tilslag og genbrugsbeton på industriel skala. Derudover stilles der i den gældende lovgivning en række krav til både tilslag og beton, bl.a. må genbrugsbeton kun anvendes i passiv eksponeringsklasse, f.eks. beton anvendt til indvendige konstruktioner.

Der er behov for udvikling af flere anvendelsesområder for nedknust murværk og beton, specielt når dette ikke er udsorteret, samt metoder til at behandle den blandede fraktion, så den kan anvendes som et nyt råmateriale.





Få hjælp hos
Teknologisk Institut

Få hjælp hos Teknologisk Institut

At designe bygningsdele og -materialer med adskillelse for øje er en krævende proces, hvor specialistviden om de indgående materials egenskaber ofte er nødvendige.

Teknologisk Institut kan hjælpe med produktudvikling og dokumentation af produkter og processer i forhold til Design for Disassembly. Teknologisk Institut huser over 140 faglige eksperter med specialistviden og erfaring med stort set alle byggematerialer og -processer.

Vores viden og erfaring med byggematerialer og vores brede faglige fundering gør os i stand til at bidrage i alle dele af udviklings-

forløbet fra idéfase til dokumentation af det færdige produkt.

Derudover har Teknologisk Institut et indgående kendskab til både den Europæiske byggevarelovgivning (Byggevareforordningen) og de nationale funktionskrav til bygninger (Bygningsreglementet). Vi er derfor godt rustet til at rådgive dig i forhold til, hvordan den lovmæssige regulering påvirker dine produkter og processer i forhold til design for disassembly.

Teknologisk Institut er desuden dybt involveret i standardisering inden for byggeri og byggematerialer.



Teknologisk Institut kan hjælpe med rådgivning, prøvning, udvikling og dokumentation indenfor blandt andet:

- Nye produkter og samlingstyper
- Materialekendskab og anbefalede materialekombinationer
- Funktionsevne
- Genanvendelses- og genbrugspotentiale
- Prøvning og dokumentation af mekanisk egenskaber (f.eks. materialer og samlinger)
- Prøvning og dokumentation af holdbarhed
- Mærkning og sporbarhed af komponenter og materialer
- Påvirkning af indeklimate (afgasninger af uønskede stoffer)
- Kemisk analyse
- Tilstandsvurderinger
- Holdbarhed og restlevetidsvurderinger
- LCA-beregninger (Life Cycle Assessment)
- Benchmarking med kendte produkter og systemer
- Lovgivning og standarder

Litteratur

1. InnoBYG (2018a). Idékatalog over designstrategier for disassembly i præfabrikeret byggeri. InnoSpire projekt, publikationen udgivet af Innobyg og CINARK.
2. BUILDING A CIRCULAR FUTURE (2016). Published in 2016 with support from the Danish Environmental Protection Agency. ISBN 978-87-998670-1-1.
3. Olugbenga et al. (2017). Design for Deconstruction (DfD): Critical success factors for diverting end-of-life waste from landfills. Waste management (60) 3-13.
4. InnoBYG (2014). Dilemmaer og overvejelser i det bæredygtige byggeri. ISBN 978-87-996246-4-
5. Crowther (2001). DEVELOPING AN INCLUSIVE MODEL FOR DESIGN FOR DECONSTRUCTION. CIB Task Group 39 meeting, Wellington, New Zealand, 2001. CIB Publication 266.
6. Crowther (2000). DEVELOPING GUIDELINES FOR DESIGNING FOR DECONSTRUCTION. BRE, Watford, England, may 2000.
7. SBI (2015). Genbrug af byggevarer, Forprojekt om identifikation af barrierer, SBI 2015:30.
8. InnoBYG (2018b). Frivillig bæredygtighedsklasse i Bygningsreglementet. Oplæg fra byggebranchen.
9. MFVM (2017). Advisory Board for cirkulær økonomi. Anbefalinger til regeringen.
10. Draft International Standard ISO/DIS 20887:2019, Sustainability in buildings and civil engineering works – Design for disassembly and adaptability – Principles. Requirements and guidance



Om håndbogen

Design for Disassembly er udpeget som et væsentligt princip for forebyggelse af affald i byggeriet. Metoden gør det muligt at adskille komponenter og materialer i en bygning, så de kan genanvendes eller genbruges.

Håndbogen samler op på udvalgte undersøgelser og giver eksempler på konkrete koncepter og materialer, som kan have forskellige fordele og ulemper i forhold til Design for Disassembly.

